

60Hz 절연변압기가 없는 고주파링크방식 계통연계형 태양광발전시스템 고찰

劉權鍾, 鄭永錫, 崔宙燁*

Study of 60Hz Transformer-less High Frequency Linked Grid-Connected Power Conditioners for Photovoltaic Power System

Gwon-Jong Yu, Young-Seok Jung, and Ju-Yeop Choi

요 약

본 연구는 60Hz 절연변압기가 없는 형태의 고주파링크방식의 계통연계형 PCS(Power Conditioning System)를 개발하였다. 본 시스템은 고주파 DC-DC 컨버터, 고주파 절연변압기, 풀브리지 다이오드 정류기, DC filter, 저주파 인버터, LC 필터로 구성되어 있다. 고주파 DC-DC 컨버터는 20kHz의 bipolar PWM 펄스를 발생시키며, 이 펄스는 고주파 절연변압기를 통해 승압되고, 풀브리지 다이오드를 통해 정류된다. 마지막으로 저주파 인버터를 통해 정현파 전류가 계통에 유입되게 된다. 제안한 고주파링크방식의 시스템은 기존의 60Hz 절연변압기를 사용하는 시스템보다 많은 스위칭 소자가 사용되지만, 60Hz 절연변압기를 생략함으로써 시스템의 소형경량화 및 저가화를 이룰 수 있었다.

ABSTRACT

This paper proposes an inverter for the grid-connected photovoltaic system based on the transformer-less inverter. This system consists of a high frequency DC-DC converter, high frequency transformer, diode bridge rectifiers, a DC filter, a low frequency inverter, and an AC filter. The 20kHz switched high frequency converter is used to generate bipolar PWM pulse, and the high frequency transformer transforms its voltage twice, which is subsequently rectified by diode bridge rectifiers for a full-wave rectified 60 Hz sine wave power output. Even though the high frequency link system needs more power semiconductors, a reduced size, light weight, and saved parts cost make this system more comparative than other power conditioning systems due to elimination of 60Hz transformer.

Key Words : Photovoltaic, High frequency Link, Transformer-less, Power Conditioning System

1. 서 론

최근 범세계적으로 급격한 기후변화와 화석에너지의 고갈에 따른 에너지·환경문제가 심각하게 논의되고 있는 실정이다. 이러한 문제에 대한 한 대안으로서 태양광발전 및 풍력발전 등과 같은 대체에너지 연구개발이 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 범정부차원에서 이루어지고 있다. 특히 미래 에너지원 중에서도 무한정하며 또한 청정한 자연에너지원으로서 각광

*광운대학교 전기공학과 조교수
E-mail : juyeop@daisy.kwangwoon.ac.kr
접수일자 : 2002. 8.10
1차심사요청일 : 2002. 8.13
심사완료일 : 2002.10.14

을 받고 있는 태양광발전은 에너지원의 다양화·분산화가 추진되는 상황이다. 최근에는 지역에 따른 편중성이 없고 설치 규모의 선정에 자유로운 소규모 주택용 태양광발전시스템의 개발이 활발하게 추진되고 있다. 현재 국내에서는 대체에너지를 이용하여 발전된 전력을 상용계통에 공급할 수 있도록 하는 전기사업법의 개정이 진행 중에 있으며, 가까운 시일 안에 주택용 계통연계형 태양광발전시스템의 시범보급사업이 시행될 전망이다. 따라서 국내에서도 계통연계형 태양광발전시스템에 대한 연구가 활성화되어야 할 것으로 사료된다.

최근 국외에서 개발되어 사용되고 있는 계통연계형 인버터의 종류는 저주파 절연변압기형(60Hz), 고주파 링크형, 저주파 절연변압기가 없는 형으로 구분되며, 국내에서 개발되어 사용되고 있는 계통연계형 인버터는 주로 저주파 절연변압기형(60Hz)을 사용하고 있다. 이러한 변압기는 계통과의 전기적 절연과 인버터의 출력전압을 계통전압의 크기로 승압하기 위하여 사용되며, 계통 주파수로 동작하기 때문에 전체 시스템의 효율과 소형 경량화에 문제점을 지니고 있다. 특히 절연변압기가 없는 형은 계통과 전기적으로 절연이 되지 않기 때문에 안정성을 확보하기 위하여 제어가 복잡하고 부가적인 보호회로를 필요로 하는 단점이 있으나, 저주파 변압기를 사용하지 않기 때문에 저가의 시스템 구현에 적합하다. 또한 고주파링크형은 많은 파워 스위치 소자를 사용하는 단점이 있지만, 저주파 절연변압기를 사용하지 않으면서도 계통과의 전기적인 절연을 제공하면서 고효율화, 소형경량화, 전체 시스템 가격의 저가화가 가능하다는 장점이 있다^{[1]-[3]}.

본 논문은 3kW급 고주파링크 방식을 이용한 PV용 PCS의 토폴로지와 동작에 대하여 소개하고, 실험 및 성능평가를 통하여 시스템의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 고주파링크 방식을 이용한 PV 시스템

2.1 태양전지의 모델링 및 시뮬레이션

태양전지에서 발생하는 전압과 전류의 관계는 심한 비선형 특성을 갖기 때문에, 보다 정확한 시스템 특성을 보여줄 수 있는 전체 시스템 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 태양전지 어레이의 모델링이 선행되어야 한다. 본 절에서는 태양전지 어레이의 등가회로 및 주어진 상수를 이용하여 *PSpice* 모델을 제시하고, catalogue data 및 실측치, 그리고 시뮬레이션 결과를 비교하여 그 유효성을 보이고자 한다.

2.1.1 태양전지의 모델링

그림 1은 태양전지의 등가회로를 보여주며^[4] 단락전류 I_{sc} 는 이상적으로 광전류 I_L 과 일치하고, 다이오드 포화전류 I_0 에 의해서 결정되는 태양전지의 개방전압은 다음 식 (1)과 같다.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_L}{I_0} + 1 \right] \quad (1)$$

여기서, V_{oc} = 개방전압, k = 볼츠만 상수, q = 전하 [C], T = 태양전지 동작전압 [K]을 나타낸다.

또한, 온도의 변화에 따른 단락전류와 개방전압의 관계식은 다음 식 (2)와 같다.

$$I_{sc} = I_0 \left[e^{\left(\frac{qV_{oc}}{kT} \right)} \right] \quad (2)$$

태양전지 모듈은 원하는 전압과 전류를 얻기 위하여 다수의 태양전지 셀을 직·병렬로 연결하여 구성하고, 또한 태양전지 어레이는 이러한 모듈을 다시 직·병렬로 연결하여 제작한다. 일반적으로 36개의 태양전지를 직렬로 연결한 50 W급 태양전지 모듈이 널리 사용되고 있다.

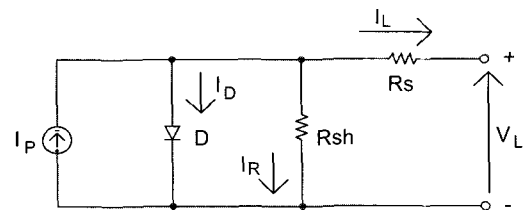


그림 1 태양전지 등가회로
Fig. 1 PV Cell Equivalent Circuit

2.1.2 태양전지 어레이의 *PSpice* 모델링

태양전지 어레이의 I-V 특성곡선을 얻기 위한 수식은 다음 식 (3)~(6)과 같이 표현된다.

$$I_p = \{ I_{sc} S_N + I_i (T_c - T_r) \} N_p \quad (3)$$

$$I_D = \left\{ I_0 \left[e^{\frac{qV_L}{AKTN_s}} - 1 \right] \right\} N_p \quad (4)$$

$$I_0 = I_{or} \left[\frac{T_c}{T_r} \right]^3 e^{\frac{qE_g}{Bk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right)} \quad (5)$$

$$S = 100 \sin[15 \times SH - 90^\circ] \quad (6)$$

여기서, I_p = 광전류,
 S_N = 단위일사량,
 I_t = 단락전류 온도계수[A/K],
 I_D = 다이오드전류,
 I_O = 역포화전류,
 N_p = 모듈의 병렬연결 수,
 N_s = 태양전지의 직렬연결 수,
 T_c = 태양전지 온도[K],
 T_r = 태양전지 기준온도[K],
 A, B = 제조상수, I_{or} = 역포화전류,
 E_g = 에너지밴드갭, S = 일사량[mW/cm²],
 S_H = 시간을 의미한다.

그림 2는 PSpice로 구현한 태양전지 모듈의 모델을 나타내고 있다. 그림 2에서 R1과 R2는 광전류원과 다이오드 전류원 사이에 단락회로가 구성되어 나타나는 convergence error를 피하기 위한 것이고, R3는 전압원 V1과의 단락회로를 막기 위한 것이다. 시뮬레이션 수행시 RL의 값을 0~∞까지 변화시킴으로써 태양전지 어레이의 I-V 특성곡선을 얻을 수 있다.

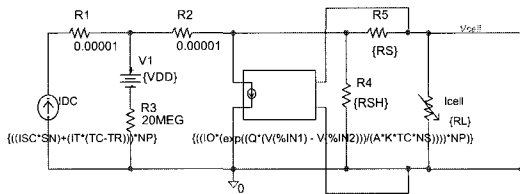
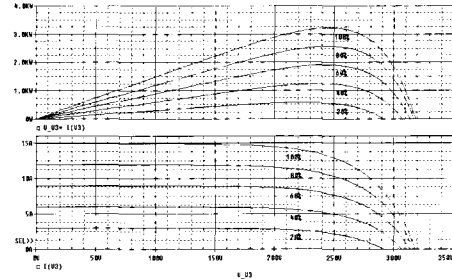


그림 2 태양전지 모듈의 PSpice 모델
 Fig. 2 PSpice Modelling of PV Module

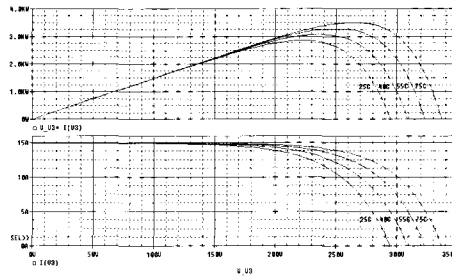
2.1.3 태양전지 모듈의 PSpice 시뮬레이션 결과

그림 3은 (주)삼성전자의 태양전지 모듈인 SM-60을 모델로 시뮬레이션을 수행한 결과로 나타난 I-V 특성곡선과 P-V 특성곡선을 나타낸다. SM-60은 36개의 태양전지를 직렬로 연결한 태양전지 모듈이다. 따라서, $N_s = 36$, $N_p = 1$ 을 대입하였다.

표 1은 SM-60의 카탈로그에서 제시된 데이터와 시뮬레이션 결과 데이터의 비교를 나타낸다. 표 1에 의하면 개방전압을 제외한 각각의 오차율이 4% 이내로 신뢰성이 매우 높음을 알 수 있다. 따라서 이러한 태양전지 어레이의 모델을 인버터 시뮬레이션에 적용한다면, 실제의 시스템과 매우 유사한 특성을 나타낼 수 있다.



(a) 일사량 변화에 따른 PV, IV 곡선
 (a) PV, IV Characteristics for variations of insolation



(b) 온도 변화에 따른 PV, IV 특성 곡선
 (b) PV, IV Characteristics for variations of temperature

그림 3 일사량 및 온도 변화에 따른 PV 어레이의 특성곡선 (3.2kW)

Fig. 3 Simulation Results of PV Array Characteristics for 3.2kW

표 1 SM-60에 대한 PSpice 시뮬레이션 결과와 제시된 데이터 비교 (S = 1000 W/m², T_c = 25 °C)
 Table 1 Data Comparison between simulation and Catalogue for SM-60 PV Module

SM-60	시뮬레이션 결과	카탈로그 데이터	실험 결과	오차율 (%)
개방전압 [V]	22.38	21.10	22.2	6.06
단락전류 [A]	3.77	3.80	3.92	0.78
최대전력 [W]	57.99	59.85	59.89	3.10
전압(VPK)[V]	17.03	17.10	16.66	0.40
전류(IPK)[A]	3.40	3.50	3.60	2.85

2.2 주택용 계통연계형 태양광발전시스템

최근 주택용 계통연계형 3kW급 인버터 개발을 위하여 연계형 태양광발전시스템의 토폴로지를 검토하고, 그 중 효율, 외관의 크기, 중량, 가격면에서 장점을 가

지는 고주파링크 방식의 토폴로지를 채택하였다. 본 절에서는 고주파링크 시스템의 동작 특성 및 태양전지 어레이를 포함한 시뮬레이션 및 실험결과를 제시한다.

2.2.1 고주파 링크 방식의 태양광발전

고주파링크 방식의 태양광발전시스템의 토폴로지를 그림 5에 나타내고 있다. 고주파링크 시스템은 태양전지 어레이와 단상 풀브리지 고주파 인버터, 고주파 변압기, 단상 풀브리지 다이오드 정류기, DC 리액터, 단상 풀브리지 저주파 인버터, 교류 LC필터로 구성된다.

제안한 시스템은 그림 5에서 보이는 바와 같이 다음과 같은 전력변환 과정을 수행한다.

- 1) 단상 고주파 인버터 브리지는 태양전지 어레이의 DC 전압을 20kHz의 quasi-square 전압으로 변환하여 고주파 변압기인 T₁에 인가한다.
- 2) 고주파 인버터의 스위칭을 적절히 제어함으로써, T₁의 출력전류의 크기를 PWM 패턴으로 제어하여, 고주파 변압기의 포화를 방지한다.
- 3) 고주파변압기 T₁은 전압을 2배로 승압한다.
- 4) T₁의 2차측 고주파 전압은 다이오드 정류기 D₁-D₄를 통하여 정류된다.
- 5) 이것은 다시 고주파 DC 리액터 L_{DC}에 반파 정현파의 전류 I_{LDC}로 변환된다.
- 6) 저주파 인버터 T₁-T₄는 계통전압과 동상의 전파 정현파로 변환하여 계통에 공급한다.

즉 일반적인 범용 인버터와 달리 태양광용 인버터는 상시 계통과 연계되어 운전되는 특징을 지니고 있다 [5]-[7]. 고주파 인버터의 이상적인 전압, 전류 파형을 그림 6에 나타내고 있다.

인덕터 전류 I_{LDC}를 반파 정현파 형태의 기준전류 I_{LDC}*에 추종시키기 위하여, Q₁, Q₄가 최초로 on되면, L_{DC}에 전류가 축적되고, 변압기 T₁에 자속이 여기된다.

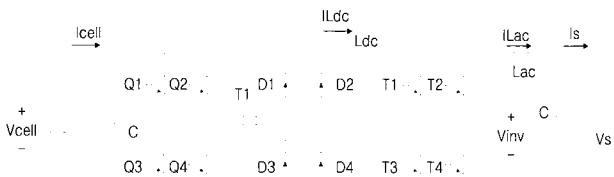


그림 5 고주파링크 방식의 연계형 인버터 토폴로지
Fig. 5 Topology of High-Frequency Type Grid-Connected Inverter

T₁의 자속이 자속의 한계치 Ψ^* 에 도달하면 Q₄는 off 되고 Q₂의 다이오드를 통하여 단락회로가 구성되어 T₁에는 영전압이 형성되어 자속을 유지하게 된다. 이때 다이오드 정류기를 통하여 L_{DC}에 축적된 전류는 감소하게 된다. 인덕터 전류 I_{LDC}가 기준전류 I_{LDC}*보다 작아지면 Q₁은 off되며 Q₃, Q₂가 on되어, T₁에는 반대 방향의 자속이 여기되며, 인덕터 전류 I_{LDC}는 다시 증가하게 된다. T₁의 자속이 $-\Psi^*$ 에 도달하면 Q₂는 off되고 다시 인덕터 전류 I_{LDC}가 I_{LDC}*까지 감소하여 Q₃가 off될 때까지 off상태를 유지하게 된다.

그림 7은 제시한 토폴로지를 PSpice 모델로 구현한 것을 나타낸다.

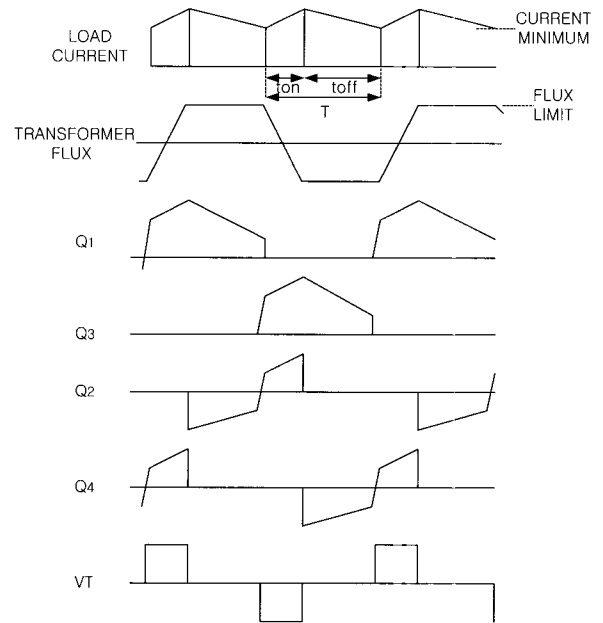


그림 6 고주파인버터의 이상적인 전압, 전류 파형
Fig. 6 Ideal Voltage & Current Waveforms for High-Frequency Type

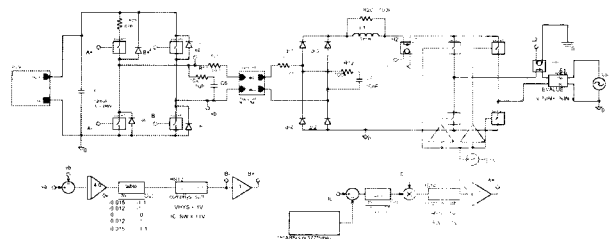


그림 7 고주파링크형 태양광발전시스템의 PSpice 모델
Fig. 7 PSpice Model of Proposed System

2.2.2 고주파링크형 인버터의 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서 이용한 태양전지 어레이는 3kW를 적용하기 위하여 SM-60 패널을 15 직렬, 4 병렬로 연결하는 것을 가정하였으며, 그림 8은 고주파 변압기 T₁의 1, 2차측 전류와 인덕터 전류 I_{LDC} 계통에 유입되는 전류 I_s를 나타낸다.

그림 9는 시스템에 연결된 태양전지 어레이의 전압, 전류 파형을 나타내고 있으며, 그림 10은 계통전압 V_s

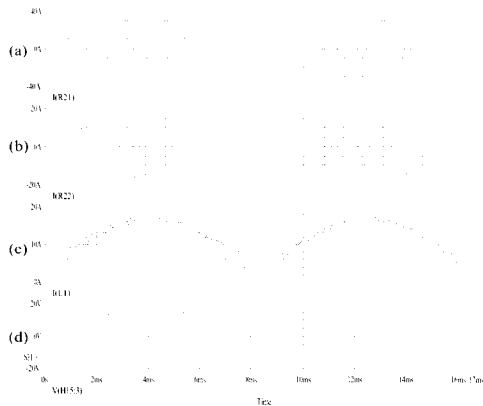


그림 8 (a) T₁의 1차측, (b) T₁의 2차측, (c) 인덕터 L_{dc}, (d) 계통유입 전류 파형

Fig. 8 Simulation Results of Current Waveforms (a) Primary Part of Transformer(T₁), (b) Secondary Part of Transformer(T₁), (c) Inductor Part(L_{dc}), (d) Utility Part



그림 9 태양전지 어레이의 (a)전압, (b)전류 파형 (3kW, S=866 W/m²)

Fig. 9 Simulation Results of PV Array (3kW, S=866 W/m²) (a) Voltage Waveform, (b) Current Waveform

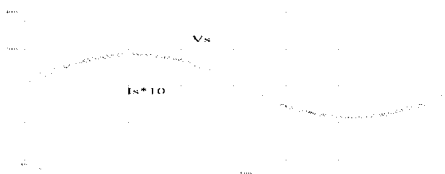


그림 10 계통전압 Vs와 유입전류 Is(×10)
Fig. 10 Simulation Result of Utility Voltage (Vs) and Current (Is×10)

와 계통에 유입되는 인버터 출력전류 I_s의 파형을 나타내고 있다. 여기서 시스템이 계통전압에 대해 역률 1로 제어되고 있음을 알 수 있다.

2.2.3 고주파링크형 인버터의 실험결과

그림 11은 제안한 시스템인 고주파링크형 PV용 PCS의 3kW급 시제작 실험장치를 보이고 있다. 그림 12~15는 시뮬레이션 결과와 일치하는 실험결과의 파형을 나타내고 있다. 그림 16은 계통전압(V_s)와 유입전류(I_s)의 THD 분포도를 나타내고 있다. 계통 유입전류의 THD가 높다는 것이 해결해야 될 문제점으로 남아 있다. 또한 태양전지의 출력이 수시로 변하는 경우의 제어기의 추종방법은 Two-mode 제어방식을 사용하여 낮은 일사량에서도 양호한 추종특성을 보인다^[5].

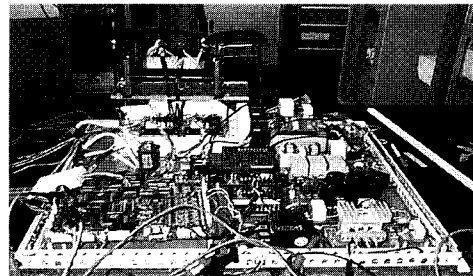


그림 11 고주파링크방식의 연계형 인버터 시제품
Fig. 11 Prototype of Proposed System

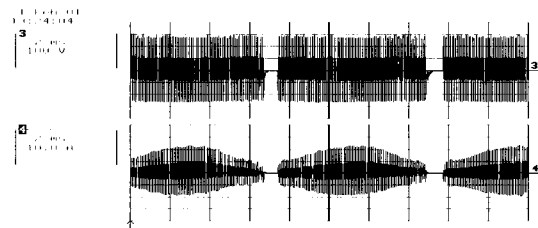


그림 12 고주파변압기의 1차측 입력전압(V_{tr in}), 전류(I_{tr in})
Fig. 12 Primary Input Voltage (V_{tr in}) & Current(I_{tr in}) of High-Frequency Transformer

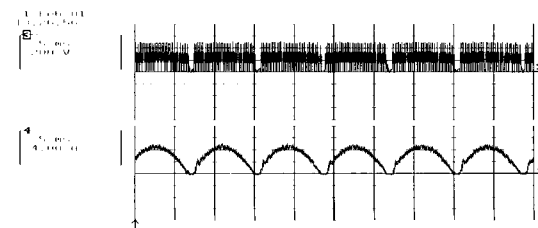


그림 13 다이오드 정류기의 출력측 전압(V_{dc}), 전류(I_{dc})
Fig. 13 Output Voltage (V_{dc}) & Current (I_{dc}) of Diode Bridge Rectifier

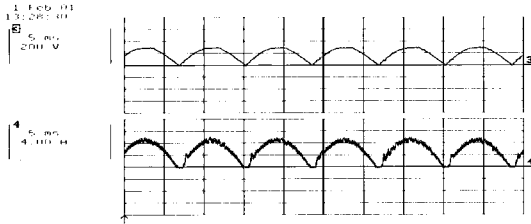


그림 14 DC 리액터의 출력전압(V_{Ldc}), 전류(I_{Ldc})
 Fig. 14 Output Voltage (V_{Ldc}) & Current (I_{Ldc}) of DC Reactor

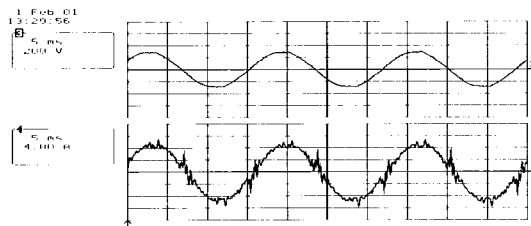


그림 15 계통전압(V_s)과 유입전류(I_s)
 Fig. 15 Utility Voltage (V_s) & Current (I_s)

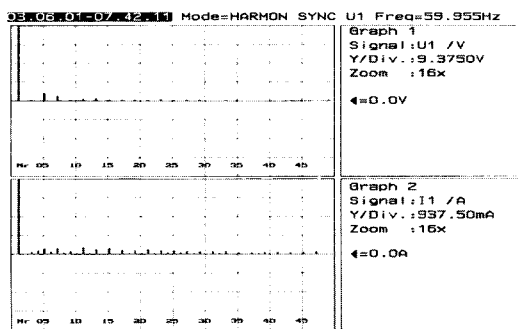


그림 16 계통전압(V_s)과 유입전류(I_s)의 THD 분포도
 Fig. 16 THD of Utility Voltage (V_s) & Current (I_s)

3. 결 론

본 논문은 고주파링크 방식의 계통연계형 태양광발전시스템에 대하여 고찰하였으며, 태양전지 어레이 모델링의 유효성을 시뮬레이션을 통하여 입증하였고, 이를 시스템에 적용시킴으로써, 전체 시스템의 시뮬레이션을 구현하였다. 또한 실험을 통하여 시뮬레이션의 유효성을 보였으며, 본 시스템은 전 부하시 90% 이상의 효율을 나타내고 있으며, 자세한 효율 측정방법은

참조문헌 [5]에 자세히 기술되어 있다. 차후 계통 유입 전류의 THD를 감소시키는 연구를 진행할 계획이다.

이 연구는 한국과학재단 (R01-2001-00313-0-2002)의 연구지원을 받아서 수행한 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] A. Cocconi, S. Cuk, and R.D. Middlebrook, "High-Frequency Isolated 4kW Photovoltaic Inverter for utility Interface", PCI/MOTOR-CON Proceedings, pp. 39~59, 1983.
- [2] T. Takebayashi, H. Nakata, M. Eguchi, and H. Kodama, "New Current Feed back Control Method for Solar Energy Inverter using Digital Signal Processor", PCC-Nagaoka, pp. 687~690, 1997.
- [3] R.L. Steigerwald, "Application of Power Transistors to Residential and Intermediate Rating Photovoltaic Array Power Conditioners", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-19, No. 2, pp. 254~267, March/April 1983.
- [4] R. Katan, V.G. Agelidis, C.V. Nayar, "Pspice Modelling of Photovoltaic Arrays", International Journal Electrical Engineering Education, pp. 319~332, October 1995.
- [5] 유권중 외 2인, "MPPT 제어 알고리즘 고찰 및 효율시험 평가법", 전력전자학회 논문지 제6권 제2호 2001. 4.
- [6] 유권중 외 6인, "순시치 제어기를 이용한 태양광발전용 전력변환장치 동작특성", 전력전자학회 논문지 제4권 제1호 1999. 2
- [7] 정영석 외 4인, "태양광, 풍력 복합발전용 PCS시스템 제어특성분석", 전력전자학회 논문지 제5권 제1호 2000. 2.

저 자 소 개



유권중(劉權鍾)

1954년 8월 5일생. 1982년 조선대 전기공학과 졸업. 1985년 일본 KOBE대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1989년~1990년 일본 Fuji전기(주) 종합연구소 주임연구원. 1997년 일본 전력중앙연구소 객원연구원.

1998년 태양에너지학회 학술상 수상. 1990년~현재 한국에너지기술연구소 태양광발전팀 팀장. 당 학회 편집이사.



정영석(鄭永錫)

1970년 12월 9일생. 1994년 충북대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 한국에너지기술연구원 태양광발전팀 연구원.



최주엽(崔宙燁)

1983년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 Texas Univ. 졸업(석사). 1994년 Virginia Tech. Electrical Eng. 졸업(박사). 1983년~1988년 이화전기개발실. 1994년~1995년 Virginia Tech. Post Doc. 1995년~1999년 한국과학기술원 지능제어연구센터 선임연구원. 현재 광운대 전기공학과 조교수. 당 학회 편집위원.